

## Выводы.

Таким образом, приведённые выше данные, полученные для конечной передачи трактора «Беларусь», достаточно убедительно свидетельствуют об эффективности применения модификации в виде проточки вдоль вершины зуба и расчёта её параметров по методике [6]. Так, благодаря модификации зубьев жёсткость передачи удалось снизить до 36%, коэффициент  $K_\beta^0$  уменьшить до 13.3%, а коэффициент  $K_\beta$  – до 3.87%.

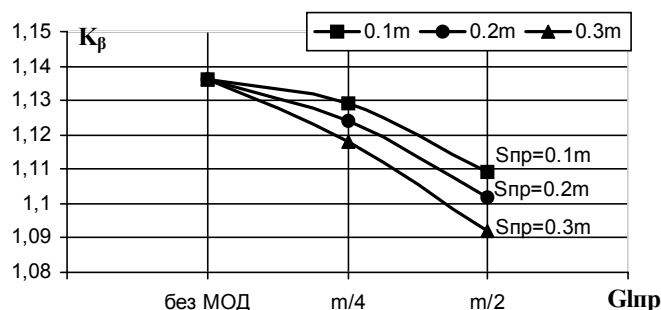


Рис. 3. Изменение коэффициента неравномерности распределения нагрузки по ширине венца прямозубой передачи ( $z_2/z_1 = 69/13$ ) в зависимости от параметров модификации с проточкой вдоль вершины зуба

**Список литературы:** 1. Берестнев О.В., Жук И.В., Неделькин А.Н. Зубчатые передачи с повышенной податливостью зубьев. – Минск: Наука и техника, 1993. – 184с. 2. Берестнев О.В., Соболев А.С. Зубчатые колёса пониженной виброактивности. – Минск.: Наука и техника, 1978. – 120с. 3. Сухоруков Ю.Н. Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колёс. – Киев: Техника, 1992 – 200с. 4. Заблонский К.И. Зубчатые передачи. Распределение нагрузки в зацеплении. Техника, 1977. – 208с. 5. Петрусевиц А.И. Зубчатые передачи // Детали машин: в 3 т. – М.-Л., 1953. – Т. 3. 6. Кириченко А.Ф., Бережной В.А., Воронцова Д.В. Метод определения вида и параметров модификации прямозубых цилиндрических зубчатых колёс на стадии проектирования. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – Вип. 22. – С.28–36.

Поступила в редколлегию 21.04.08

УДК 539.3

А.Д. ЧЕПУРНОЙ, докт. техн.наук, Т.В. ПОЛИЩУК, ОАО «ГСКТИ», г. Мариуполь,  
Н.А. ТКАЧУК, докт. техн.наук, Н.Н. ТКАЧУК, НТУ «ХПИ», Харьков

## ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ CAD/CAM/CAE-ТЕХНОЛОГИЙ

У статті описані деякі проблемні питання моделювання фізико-механічних процесів у складних механічних системах. Для розв'язання низки задач, що при цьому виникають, пропонується створювати спеціалізовані інтегровані системи автоматизованого аналізу і синтезу, які поєднують переваги спеціальних модулів та універсальних CAD/CAM/CAE-систем.

In the paper some problem questions of modeling of physical and mechanical processes in complicated mechanical systems are described. For solution of tasks' series which arise up here, it is suggested to create the specialized integrated systems of the automated analysis and synthesis, which combine advantages of the special modules and universal CAD/CAM/CAE-systems.

**Введение.** Современное машиностроительное производство характеризуется резким ростом требований к техническим характеристикам изделий, сокращением сроков их разработки и технологической подготовки производства, широкой номенклатурой и необходимостью ориентации на запросы широкого спектра потребителей. В этих условиях для обеспечения конкурентоспособности, экономичности и оперативности при проектировании, исследовании и технологической подготовке производства новых изделий повсеместно применяются средства автоматизации – CAD/CAM/CAE/PDM-системы (СССР) [1-4]. Однако их использование не решает важной и принципиальной задачи, вытекающей из совокупности требований к современным изделиям, обоснованию конструктивных, технологических параметров и эксплуатационных режимов на основе моделирования сложных физико-механических процессов, протекающих при эксплуатации и изготовлении. Поскольку сами изделия, а также условия изготовления и эксплуатации достаточно разнообразны, то их специфику трудно учесть при помощи универсальных CAD/CAM/CAE-систем, а поскольку они достаточно сложны, то требуется при моделировании применять самые современные теории, не имеющие инструментов интеграции в CAD/CAM/CAE-системы.

В результате возникает противоречие между потребностями моделирования и ограниченностью возможностей инструмента этого моделирования. В связи с этим возникает актуальная и важная научно-практическая задача разработки высокоэффективных средств автоматизированного моделирования физико-механических процессов в сложных механических системах, обладающих широкими потенциальными возможностями и учитывающих специфику определенного (того или иного) класса исследуемых объектов. Один из-

вариантов решения указанной задачи составляет цель и содержание данной работы.

**Методы решения задачи.** Как отмечалось, в качестве основного средства обеспечения решения всего комплекса возникающих задач моделирования в настоящее время применяются CAD/CAM/CAE-системы – системы автоматизированного проектирования (САПР – в широком смысле этого термина). CAD/CAM/CAE/PDM-системы стали своего рода языком и средством разработки, обладая рядом замечательных свойств: параметричность, ассоциативность, универсальность. Одной из основных тенденций их развития в последнее время является *интеграция*, т.е. соединение средств автоматизации разных этапов разработки в единой системе.

Кроме того, на данный момент СССР – это один из наиболее масштабных *бизнесов* в мире. Лидеры рынка имеют миллиардные обороты (рис. 1).

Несмотря на огромные достижения систем СССР, в их развитии содержится и противоречие. Действительно, не возникает особых проблем при автоматизации рутинных операций. Далее идут формализуемые модели разных уровней сложности. Однако более глубокий уровень – неформализуемые стороны моделей сложных и сверхсложных механических систем (рис. 2). При этом, как показывает анализ, именно эта часть моделей и представляет интерес для промышленности.

Действительно, при разработке современных машин возникает необходимость привлечения более сложных моделей физико-механических процессов. При этом формат, «язык» математических моделей напрямую не позволяет интегрировать эти модели в среду CAD/CAM/CAE-систем. Кроме того, существуют сложности формализации сведений о том или ином классе объектов, существующих в виде опыта и знаний конструкторов, технологов, исследователей-экспертов.

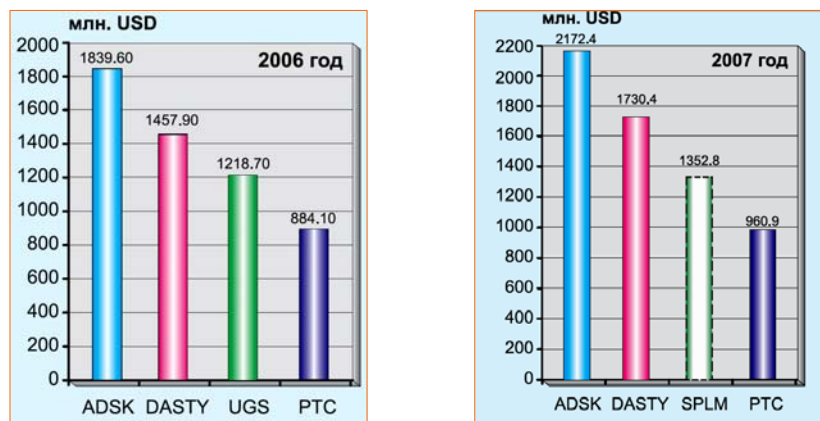


Рис. 1. Уровни доходов фирм – лидеров рынка СССР в 2006, 2007гг. [3]

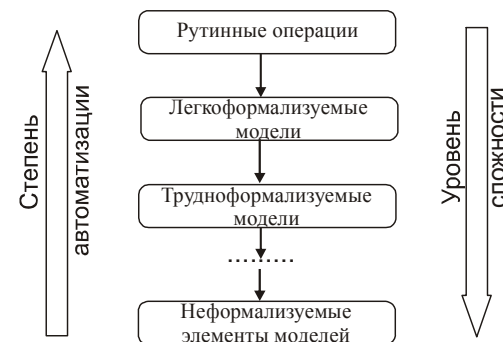


Рис. 2. Уровни сложности и степени автоматизации отдельных этапов проектирования, исследования и технологической подготовки производства новых изделий

В результате в разрезе соотношения научных разработок и САПР-технологий имеем ситуацию их раздельного существования. Крайними тенденциями при этом являются специальные, «заточенные» под конкретный тип изделий, корпоративные системы, с одной стороны, и универсальные САПР – с другой. Однако при создании конкретного изделия разработчику необходимо иметь *синтез-модели* именно под решение конкретного типа задач. Основным вопросом остается метод получения таких синтез-моделей.

Как один из вариантов решения описанной проблемы предлагается метод обобщенного параметрического описания элементов сложных механических систем, идея которого состоит в объединении операторного описания подмоделей. Это – центральная идея метода обобщенного параметрического описания элементов сложных механических систем [5]. При его использовании для описания того или иного класса конструкций формируется обобщенное параметрическое пространство  $P$ , представляющее собой объединение множеств  $P_G, P_T, P_F$ :

$$P = P_G \cup P_T \cup P_F, \quad (1)$$

где  $P_G, P_T, P_F$  – множества обобщенных параметров, однозначно и непротиворечиво описывающие геометрические, технологические и конечно-элементные модели исследуемых объектов (рис. 3).

Сами множества  $P_G, P_T, P_F$  состоят из элементов, от которых требуется следующее:

$$G = G(p), T = T(p), F = F(p) \quad \forall p \in P \quad (2)$$

являются однозначными отображениями из множества  $P$  в множества моделей  $G, T, F$  (см. рис. 3). Данное отображение не является во всех случаях математически строго формализуемым. Но это свойство, вообще говоря, в рамках предложенного подхода и не требуется.

Поскольку формализация соотношения (2) порождает в общем случае значительные сложности, то предлагается, чтобы это отображение всего лишь было однозначным, алгоритмизируемым и корректным:

$$\forall p \in P \exists \{G, T, F\} : G = G(p), T = T(p), F = F(p), \quad (3)$$

$$\{G_1, T_1, F_1\} = \{G_2, T_2, F_2\} \Rightarrow p_1 = p_2, \quad (4)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|p_\varepsilon - p\| = 0 \Rightarrow \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|\{G_\varepsilon, T_\varepsilon, F_\varepsilon\} - \{G, T, F\}\|^* = 0, \quad (5)$$

где  $\|\bullet\|$  – некоторая норма;  $\|\bullet\|^*$  – некоторая псевдонорма.

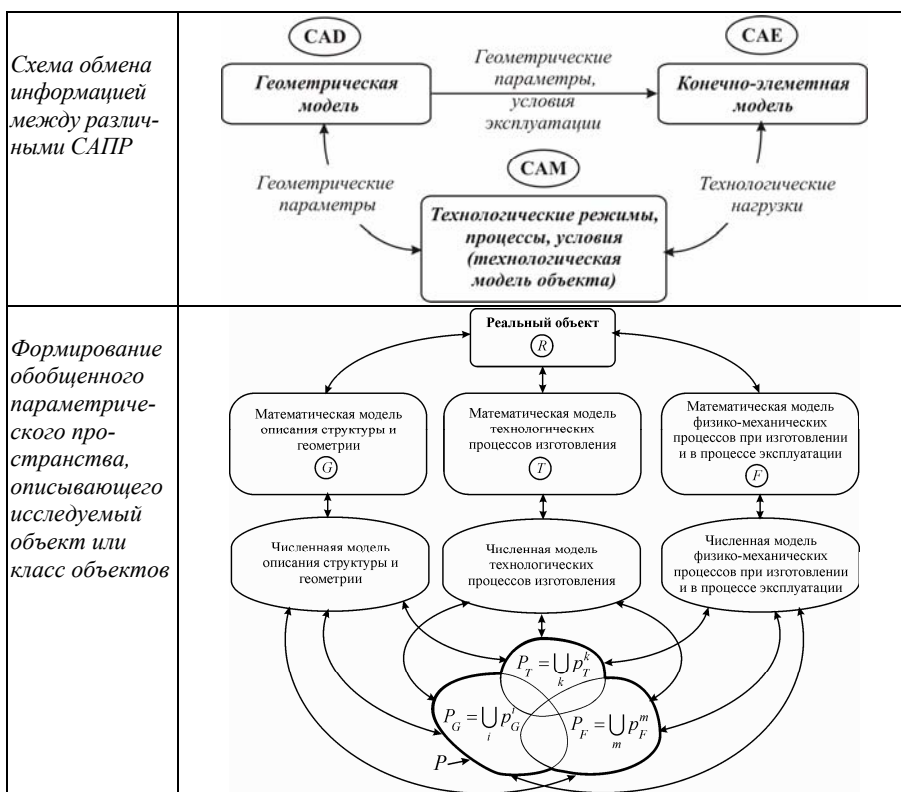


Рис. 3. Формирование обобщенного параметрического пространства для моделирования физико-механических процессов в элементах сложных механических систем

В пространстве обобщенных параметров каждый элемент представляет собой объект любой природы: число, структура, функция, распределение,

множество. Такая трактовка дает возможность формализовать процесс работы с обобщенными параметрами, распространив на них традиционный инструментарий параметрического анализа и синтеза. Кроме того, само существование соотношений (2), описывающих комплекс моделей  $M = \{G, T, F\}$ , не решает поставленную задачу. Необходимо разработать, учитывая сложность формализации (2), технологии реализации соответствия  $p \rightarrow M$ :

$$M = M(p). \quad (6)$$

Возникающая проблема обладает только кажущейся простотой. В действительности именно *разнородность* обобщенных параметров  $p$  и *неформализуемость* соотношений (2), (6) представляют в процессе исследований основные препятствия для их интенсификации на основе автоматизации при сохранении параметричности.

Нужно отметить, что многие системы CAD/CAM/CAE имеют широкий арсенал автоматизации большого числа этапов проектирования отдельных видов конструкций (например, модули автоматизированного проектирования элементов технологической оснастки, двигателей внутреннего сгорания и т.д.). В то же время множество элементов  $p$  в данном случае заранее ограничивается определенным кругом, выход за который сопряжен с потерей автоматизации, параметричности и т.д. Однако именно этот способ можно взять за прототип при алгоритмизации технологии генерирования комплекса моделей  $M$  по набору обобщенных параметров.

На рис. 4 представлена схема функционирования предлагаемой технологии моделирования. Особенность данной технологии состоит в том, что между комплексом математических моделей  $M = \{G, T, F\}$  и универсальными системами CAD/CAM/CAE помещается специализированная система-транслятор, которая для конкретного класса объектов реализует перевод соотношений (2), (6) в наборы инструкций  $S_G = S_G(p)$ ,  $S_T = S_T(p)$ ,  $S_F = S_F(p)$  в формате универсальных систем CAD/CAM/CAE. Это позволяет использовать на этапе моделирования всю мощь современных САПР, после чего проводить параметрический анализ и синтез. Соответствующий блок управления и специализированная база данных позволяют не только координировать информационные потоки в процессе автоматизированного проектирования, но и организовывать получаемые данные в структуры, пригодные для специализированных баз знаний и экспертных систем. Предложенная структура не дает общего решения проблемы для всех систем, а только для *отдельных классов объектов*, но при этом использует всю мощь универсальных САПР.

Особенно наглядно проявляются преимущества специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза при конечно-элементном моделировании. На схеме в центре (рис. 5) – критериальное

ядро конечно-элементных модели (КЭМ), а на периферии – пояс ограниченный. Видно, что любое парное отношение на схеме – конкурентное. Традиционный подход не позволяет решить задачу автоматизации создания параметризованных, качественных, управляемых КЭМ. В то же время применение предложенного подхода позволяет решить проблему создания таких моделей.

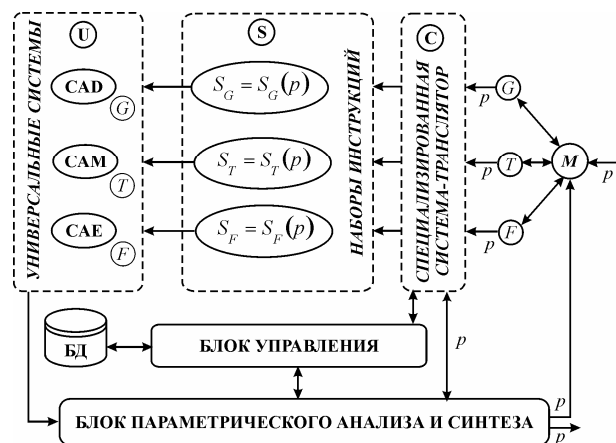


Рис. 4. Автоматизация этапов моделирования на основе обобщенного параметрического подхода и специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем

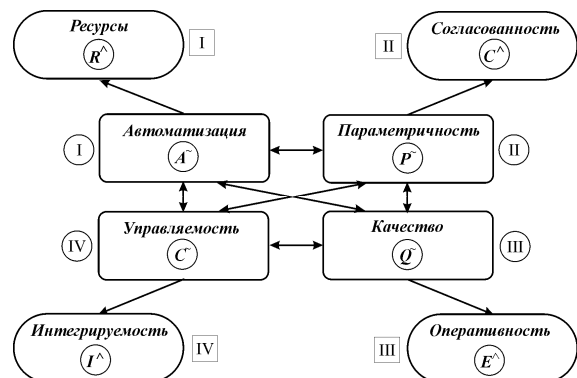


Рис. 5. Качественные характеристики конечно-элементных моделей (КЭМ) и соответствующие проблемные ограничения:  
I – автоматизация процесса создания КЭМ; II – параметричность КЭМ;  
III – качество КЭМ; IV – управляемость сеток КЭМ

Более того, решаются также проблемы, связанные с изменчивостью моделей, пополняемостью множества параметров, его полнотой (неполнотой) и сбалансированностью, миграцией параметров из подмножеств в подмножества

ва (варьируемые – постоянные, заданные – искомые, значимые – пренебрегаемые), варьируемостью критериев и ограничений, идентификацией моделей и т.д.

**Реализация предложенной технологии моделирования.** Для реализации предложенной технологии автоматизированного моделирования физико-механических процессов в сложных механических системах, кроме разработки общих подходов и структур специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза, потребовалось также решение вопросов программно-аппаратного обеспечения исследований. В центре «Тензор» НТУ «ХПИ» для этих целей аккумулированы университетские и коммерческие лицензии Pro/ENGINEER, LS-DYNA, SolidWorks, Inventor, Компас, ANSYS, WinMachine.

Естественно, что при решении задач моделирования сложных объектов требуются значительные вычислительные ресурсы, особенно при конечно-элементном моделировании. Как вариант решения проблемы – кластерная организация компьютерных мощностей, осуществляющая технологию распределенных вычислений при решении задач большой размерности.

На этой базе были выиграны несколько международных грантов, в ходе выполнения которых предложенная теория, технология и системы прошли лабораторную проверку [6]. Особенно необходимо отметить метод голографической интерферометрии и уникальные контактные пленки фирмы Fujitsu, привлекаемые для оценки точности численных исследований.

**Примеры реальных проектов.** Создан мощный инструмент моделирования в виде специализированного программно-аппаратно-модельного комплекса. Он дал возможность выполнить ряд реальных проектов. Тут следует отметить, что при их выполнении пришлось иметь дело со сложными системами, когда по некоторым факторам модели выходят на предел имеющихся возможностей (будь-то вычислительные, программные, математические или иные). Все проекты состоят из научной компоненты, высокоинтеллектуализированных моделей и конкретных результатов, внедренных в практику.

Особое место занимает проект с участием фирмы Nordex (Германия), ОАО «Азовмаш», Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Головного конструкторско-технологического института (ГСКТИ, г. Мариуполь) и Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» по оптимизации силовых элементов ВЭУ большой мощности (рис. 6).

Потребовалось решить значительные проблемы, чтобы создать качественную конечно-элементную параметризованную модель, которая прошла международную экспертизу, содержит самые передовые теоретические модели механики разрушения и, в конце концов, результат – реальные изделия с ресурсом 20 млн. циклов.



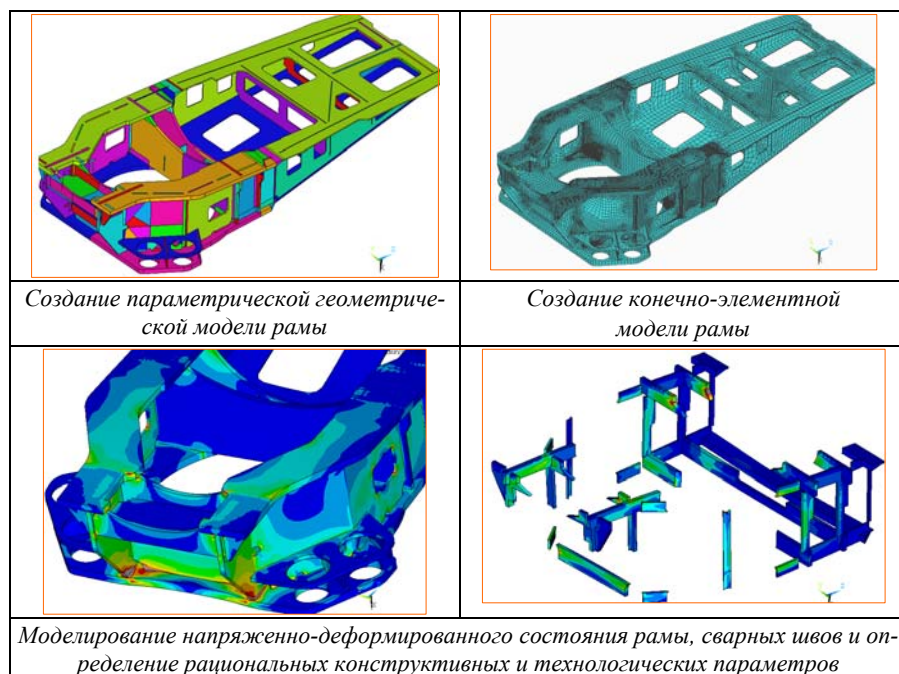


Рис. 6. Этапы исследований, проектирования и изготовления сварных рам ветроэнергетических установок большой единичной мощности

Еще один завершенный проект – по выбивной машине для уникальной линии крупного вагонного литья в ЗАО «АзовЭлектроСталь». Разработанный подход позволил не только выявить причины поломок ответственной машины, но и выработать рекомендации по оптимальному проектированию. Конечный результат – оптимизированная машина с межремонтным ресурсом 300 млн. циклов (рис. 7).

Те же подходы – при выполнении проектов механизма наклона уникальной электроплавильной печи на 60т. В данном случае проведено комплексное исследование кинематики, динамики, контактной прочности и напряженно-деформированного состояния элементов механизма наклона. Проведено макетное и численное моделирование объекта, что дало возможность разработать рекомендации по проектированию, внедренные при разработке электроплавильной печи для ЗАО «АзовЭлектроСталь» в 2008 г. (рис. 8).

**Закключение.** Подытоживая, можно отметить, что предложена, обоснована, реализована и опробована *новая технология* моделирования элементов сложных механических систем, составляющая перспективное научное направление. В работе представлены только отдельные этапы предложенной технологии исследований, проиллюстрированной некоторыми результатами.

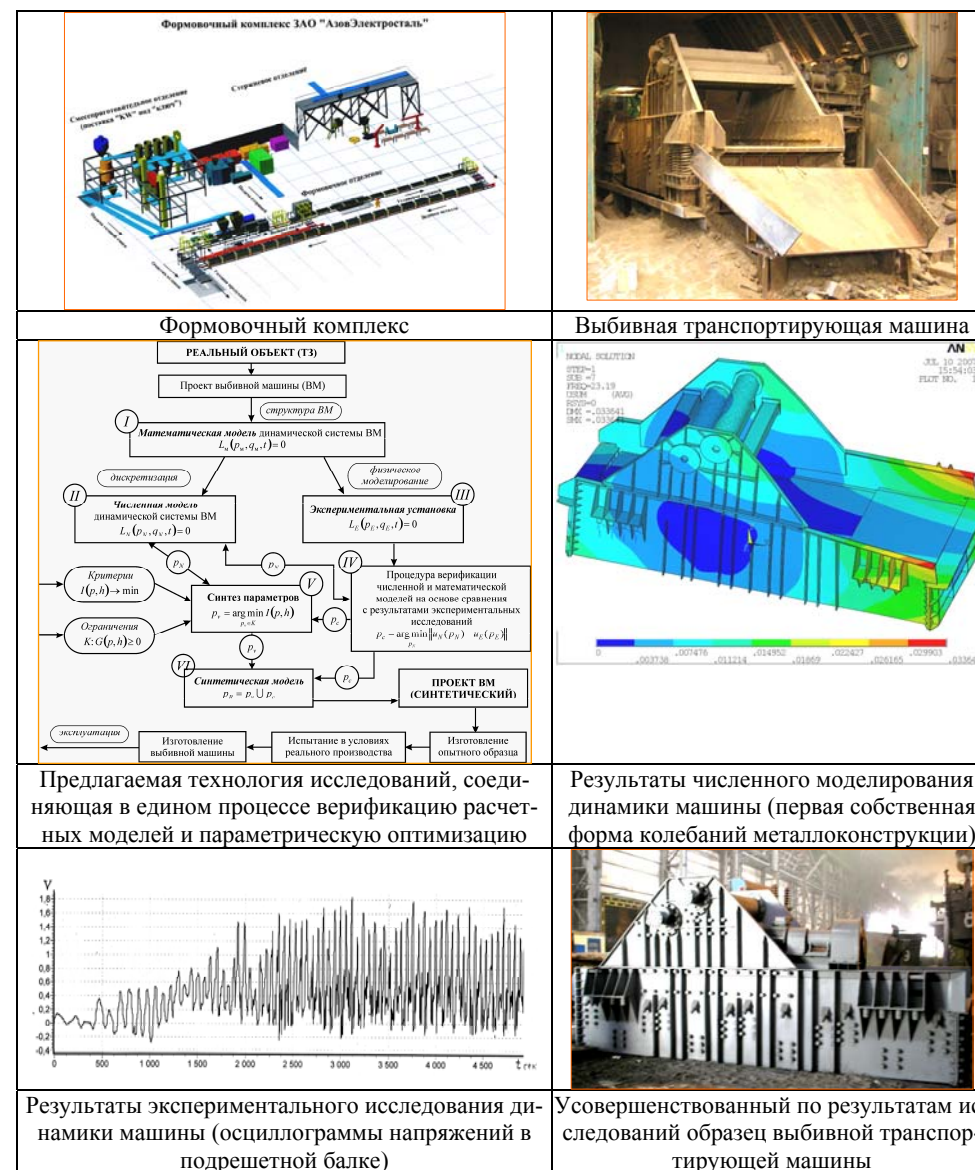


Рис. 7. Этапы исследований и совершенствования выбивной транспортирующей машины для выбивки крупного вагонного литья

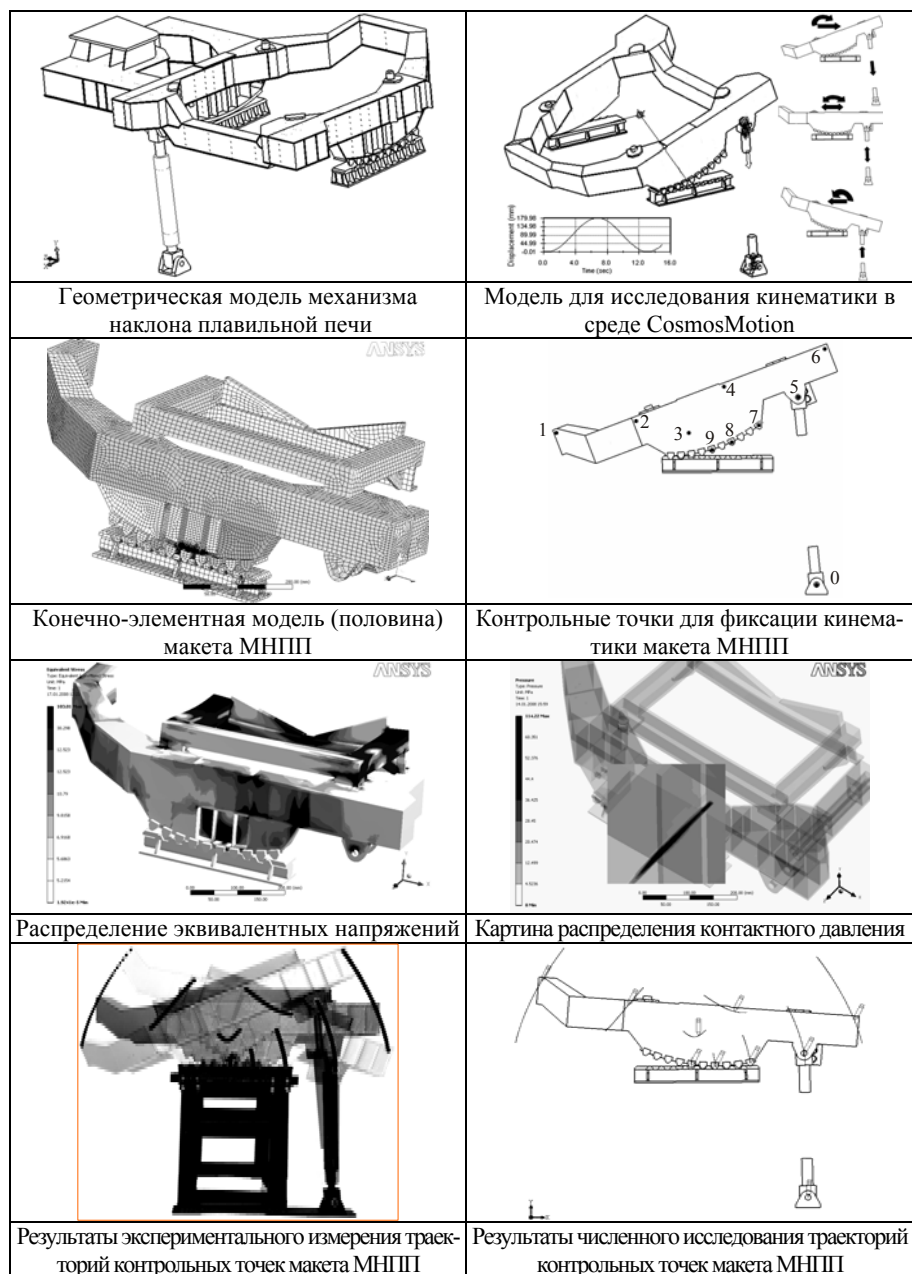


Рис. 8. Этапы исследований механизма наклона плавильной печи (МНПП)

Основное преимущество описанного в статье подхода состоит в решении задачи создания эффективного метода автоматизации процесса генерирования моделей на различных этапах исследования сложных механических систем. Вместо решения задачи в общей постановке для широкого класса конструкций предложена методика действий, приводящая к результату для определенного семейства объектов, представляющих интерес при проектировании того или иного типа машин или механизмов. Таким образом, путь громоздкого универсального моделирования заменяется моделированием, ориентированным на конкретный класс объектов, однако обладающим полным инструментарием средств моделирования, присущих современным CAD/CAM/CAE-системам. Более того, предложен инструмент интегрирования в эти модели научных разработок, что существенно повышает ценность и создаваемых моделей, и результатов, с их помощью получаемых.

При этом задекларировано появление качественно новых типов научной продукции: *мета-системы*, *мета-модели* и *мета-технологии* исследований на стыке проблем машиноведения, технологии машиностроения и информационно-компьютерных технологий.

По всем признакам и предложенная технология, и модели, и системы уже являются востребованными, а в перспективе – сверхвостребованными на отечественных и зарубежных предприятиях, НИИ, КБ и инженерных фирмах.

*Работа выполнена в рамках проекта ИТ/480-2007 МОН Украины.*

**Список литературы:** 1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 336с. 2. Куньву Ли. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560с. 3. Суханов Ю. “Короли” и “капуста” – 2007. Финансовые итоги крупнейших разработчиков САПР/PLM за 2007 г. Часть I. Фактологический аспект. – CAD/CAM/CAE Observer #2 (38) / 2008. – 8–16. 4. Суханов Ю. “Короли” и “капуста” – 2007. Финансовые итоги крупнейших разработчиков САПР/PLM за 2007 г. Часть II. Статистический аспект. – CAD/CAM/CAE Observer #3 (39) / 2008. – С.1–8. 5. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57–79. 6. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глуценко Э.В., Ткачук А.В. Решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем // Механіка та машинобудування. – 2004. – № 2. – С.85–96.

*Поступила в редколлегию 24.04.08*